
XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.

Dinámica y evolución temporal de las cubiertas de pastizal del Sistema Central a partir de imágenes hipertemporales

Teresa Bullón Mata^{*}

^{}Departamento de Geografía . Universidad Autónoma de Madrid*

Resumen

Este trabajo está basado en el análisis de un conjunto de 212 imágenes procedentes del sensor de media resolución MODIS TERRA cuya fecha de adquisición es enero 2003-marzo de 2012. El objetivo del estudio es determinar los cambios que se están produciendo en un área considerada habitualmente estable, que está situada en el centro de la Península Ibérica. Los pastos identificados se agrupan en dos conjuntos. El primer grupo reúne a las clases situadas preferentemente en las áreas de menor altitud y se caracterizan por tener tendencias evolutivas negativas de valores de NDVI. El segundo grupo contiene clases de desarrollo en primavera-verano, situadas en las laderas y cumbres de las montañas y caracterizadas por tener tendencias estables o ligeramente positivas. El contraste en las precipitaciones recibidas en las estaciones situadas en el área de estudio ayuda a entender la variabilidad temporal y espacial de las cubiertas analizadas.

Palabras clave: Imágenes hipertemporales; series temprales; sensor Modis Terra ; Sistema Central, pastos; sequías

^{*} E-mail: Teresa.bullonr@uam.es

1. Introducción

La investigación se ha realizado mediante un conjunto de 212 imágenes del índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) proporcionadas por el sensor MODIS TERRA, de 250 m de resolución, adquiridas desde enero de 2003 a marzo de 2012, con 23 imágenes por año. El análisis hipertemporal permite definir los diferentes tipos de cubiertas seminaturales de pastos, matorrales y bosques a partir de la sucesión de los diferentes estados de floración y senescencia de las referidas cubiertas en diferentes momentos del año. Como estas imágenes reflejan la incidencia de factores tanto habituales como excepcionales acaecidos durante el tiempo de observación de la muestra, es posible determinar los cambios que se producen en una clase o en un conjunto de ellas en la franja temporal analizada.

La capacidad del sensor MODIS para el análisis de la vegetación para observaciones de resolución media fue puesta de manifiesto desde el comienzo de funcionamiento de este sensor (Huete et al., 2002; Zhang et al., 2003). Numerosos estudios se han realizado posteriormente, mostrando diversidad de temas y métodos de investigación (Ganguly, Friedl, Tan, Zhang, & Verma, 2010), algunos de ellos referidos a la Península Ibérica (Barrio, Puigdefabregas, Sanjuan, Stellmes, & Ruiz, 2010; Domingo, Cristóbal, Niyerola, & Pons, 2008; Vicente-Serrano, Lasanta, & Romo, 2004).

El área en la que se centra este trabajo está situada en una parte del Sistema Central. Comprende desde el sector occidental de la Sierra de Gredos, la Sierra de Guadarrama y las Sierras de Somosierra y Ayllón que forman parte de la Comunidad Autónoma de Madrid y de las provincias de Segovia, Avila y Toledo. Estas sierras, cuya cota máxima está a 2430 m de altitud, tienen una dirección general SW_NE, se subdividen en varias alineaciones, separadas entre sí por valles profundos o fosas tectónicas, y están bordeadas por un amplio piedemonte plano, con altitud media de 700 m. en el SW y 1200 en el NE.

El objetivo concreto de esta investigación es:

- Definir el ritmo anual y la tendencia que caracteriza a cada una de las cubiertas de pastizal.
- Conocer la influencia de los factores ambientales y climáticos en el desarrollo vegetal en cada una de estas cubiertas
- Determinar los cambios que se están produciendo en las clases seleccionadas y localizar las áreas de comportamiento más dinámico.

2. Métodos de estudio

2.1. Preparación de las imágenes hipertemporales

El proceso de preparación de las imágenes ha sido:

- Creación de un archivo en el que se agrupa el conjunto de imágenes seleccionadas con fechas comprendidas entre 2003 y 2011, con corrección de los outliers (Julien & Sobrino, 2010; Ma & Veroustraete, 2006).
- Realización de una clasificación no supervisada para la obtención de una distribución de las clases que tienen valores de NDVI similar en su comportamiento temporal. El número de clases estadísticamente más adecuado se ha obtenido mediante la realización de sucesivas clasificaciones no supervisadas, con 50 iteraciones cada una de ellas, en las que el número de clases se incrementa desde 10 a 100. La selección

entre ellas de la clasificación no supervisada que mejor expresa el contenido de los datos se ha determinado mediante un estudio de separabilidad a partir de los datos proporcionados por las *signature files* de cada clase. Según este procedimiento, la imagen clasificada más adecuada es la primera en la que se aprecia una mayor distancia entre los valores de la separabilidad promedio y los de la separabilidad mínima, indicando con ello que la imagen en cuestión contiene la mejor clasificación de los datos con el menor número de clases. Esta condición la reúne la imagen de 25 clases, que es la que se ha seleccionado para el estudio. Este método está siendo aplicado con frecuencia como método inicial de trabajo en series hipertemporales para la clasificación de las imágenes NDVI que proceden de diversos sensores de media y baja resolución (de Bie, Venus, & Skidmore, 2011; Jiang et al., 2013).

- Extracción de los datos numéricos de la imagen de 25 clases y transformación de los mismos mediante una descomposición estacional aditiva. A partir de ésta se obtienen las series de factor estacional y de ciclo- tendencia, con las que se realiza el análisis de la evolución a corto y medio respectivamente.
- Selección de datos climáticos de estaciones situadas en el área de estudio. Se utilizan datos diarios de precipitación de las estaciones meteorológicas de Avila, Segovia y Puerto de Navacerrada.

2.2. Desarrollo del análisis

Contiene las siguientes fases:

- Identificación de las diferentes clases. Se consideran los siguientes criterios: 1 comparación mediante overlays de cada una de las clases identificadas con diversos mapas temáticos o con observaciones directas de terreno. 2 Estudio de la secuencia estacional de álidos y senescencias, que informa sobre la evolución anual del período vegetativo. 3 Análisis del promedio de NDVI de cada clase, que expresa la densidad de la masa vegetal de cada una de ellas.
- Análisis de las tendencias de las clases, que se realiza a partir de la variabilidad de los máximos anuales de cada clase y de la comparación de los promedios de NDVI en los grupos de años 2003-06 y 2008-2011.
- Análisis de la variabilidad espacial de las clases de pastizal en años con diferentes intensidades de desarrollo del NDVI mediante la proyección de las clases sobre mapas vectoriales 1: 200.000.

3. Resultados

3.1. Identificación de las clases

La identificación de clases viene dada automáticamente de menor a mayor valor de NDVI, de modo que la clase 1 es la que contiene el menor valor de NDVI y la clase 25 el mayor. A partir de las operaciones de *overlays* realizadas con diversos mapas de usos del suelo (CNIG, 2009) y series de vegetación (Rivas-Martínez, 1986) se asigna significado temático a las clases definidas. El resultado indica que siempre hay una cubierta dominante, que es coherente con el comportamiento temporal de la clase y con su densidad vegetal.

Han sido identificadas las siguientes clases según su secuencia estacional: 1º clases de carácter herbáceo, con un rápido desarrollo a partir de una senescencia casi absoluta, un período de actividad corta y un

agostamiento rápido; 2º clases de caducifolios, con desarrollo de NDVI importante y mantenido en primavera-verano; 3º clases siempreverdes tanto de bosques como de matorral, con desarrollo máximo en primavera, depresión importante en verano y recuperación en otoño-invierno y, por último, 4º clases de pinar, con un valor de NDVI mantenido y varios máximos anuales.

Las clases de pastizal identificadas dentro de este conjunto se organizan en dos grupos, el de pastos de montaña, que acoge a las clases 12 y 13 y el de pastos de las áreas basales de piedemonte, en el que se agrupan las clases 16 y 17. Fig1.

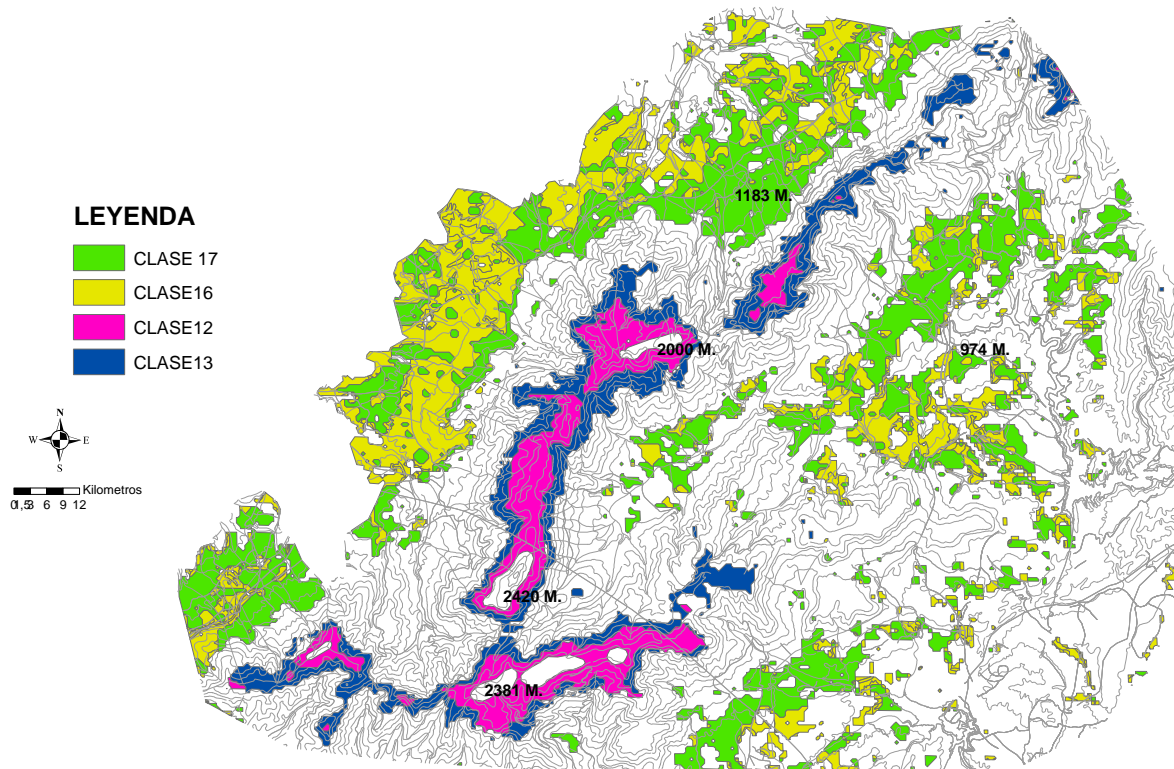


Fig 1. Localización de las clases de pastizal en el área de la Sierra de Guadarrama

Cada uno de ellos se diferencia por sus ritmos de crecimiento, temporalidad y grado de productividad vegetal. Todos estos pastos tienen alto valor natural, tanto desde el punto de vista ecológico como de paisaje, por tener en un alto porcentaje de su superficie hábitats prioritarios según la red natura 2000 de la Comunidad Europea (clases 16 y 17) o por formar parte de áreas protegidas, entre ellas el Parque Nacional del Guadarrama y contener asimismo numerosos endemismos (Clases 12 y 13). Fig 2. (Lasanta, 2010; Martínez Garrido & Sanz Herráiz, 2013; SanMiguel Ayanz, 2001)

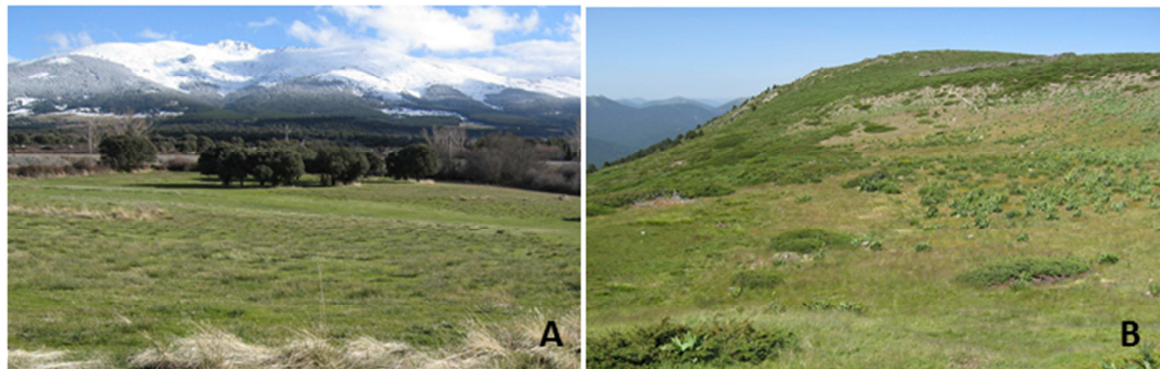


Fig 2. Aspecto sobre el terreno de los pastizales. A. Clase 16 en las proximidades de Segovia (110m). B. mosaico de clases 12 y 13 en la vertiente norte de Peñalara (2420m)

Las clases 16 y 17 tienen un máximo principal en mayo-junio y secundario en noviembre-diciembre. El verano es la estación desfavorable, mientras que el invierno es una estación de continuación del crecimiento iniciado en otoño. El 10% de la clase 16 está formado por majadales y cervunales que están catalogados como hábitats prioritarios según el mapa hábitats de la red natura 2000(MAGRAMA, 1997), nº 6220 (denominados nombre Poo bulbosae-Trifolietum subterranei Rivas Goday 1964). También hay alisedas código 91E0 (Scrophulario scorodoniae-Alnetum glutinosae Br.-Bl., P. Silva & Rozeira 1956) y vallicares código nº 3170 (Pulicario uliginosae-Agrostietum salmanticae Rivas Goday 1956. El paisaje más habitual de la clase 17 es de pastizales adeshados con fresnedas y pastos húmedos. En la región de Madrid el 2,7% de su superficie está catalogada como pastos prioritarios, de tipo mesomediterráneo y supramediterráneo. (Montserrat-Recoder, 2002; Pozo Peñalba, 2005; Rios E. & Salvador, 2009) .

Las clases 12 y 13 tienen desarrollo estival, con máximo en julio. Se extiende por las cumbres de las sierras, formando matorrales y transiciones bosque-matorral . La clase 12 es algo más efímera que la 13 , ya que esta última se mantiene con NDVI altos durante agosto, decae lentamente durante septiembre y puede tener una reactivación otoñal. Fig 3. (San Miguel Ayanz, 2009).

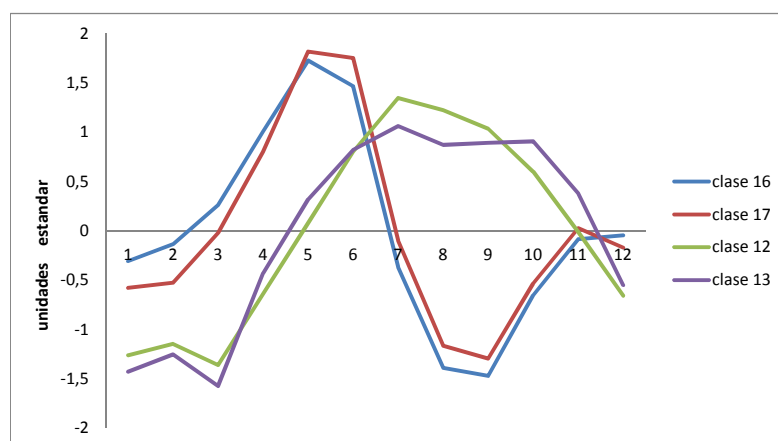


Fig 3. Ciclo evolutivo anual de las clases de pastos

3.2. Cambios temporales

En la sucesión temporal del conjunto de años estudiados se observa que el valor máximo de NDVI se suele producir en cada clase en un marco temporal muy estrecho y con frecuencia dentro de la misma quincena del año. Los máximos principales ocurren entre marzo y junio y los secundarios entre octubre y noviembre. La importancia del máximo anual de cada clase oscila cada año según las condiciones ambientales. Según se observa en La serie normalizada de máximos, la mayoría de las clases muestran depresiones muy acentuadas en 2005 y 2009 y un incremento muy apreciable en 2007. Fig 4.



Fig 4. Máximos anuales de las clases de pastos, con cambios de productividad anual muy contrastados

El estudio realizado a partir del parámetro b de las ecuaciones lineales correspondientes a los máximos principal y secundario del conjunto de los nueve años con datos indica que en el máximo principal las clases de pastos de montaña (12 Y 13), tienen evolución positiva significativa, las clases de pastos de piedemonte (16 y 17) evolución negativa significativa tanto en el máximo principal como en el secundario, mucho más importantes en éste último.

Para conocer la importancia y localización de los cambios que se producen en años de desigual comportamiento de NDVI se han diseñado comparaciones a partir de los valores anuales de máximos de cada clase. El aumento de valores de NDVI entre dos fechas diferentes indica incremento de la densidad vegetal. La disminución de los valores indica degradación. Estas comparaciones se realizan mediante sustracción de la imagen de fecha anterior de la de fecha posterior y expresando el resultado en porcentajes. Debido a que la distribución de máximos indica que hay un desigual comportamiento de las clases en los años anteriores y posteriores a 2007, se realiza una comparación de las imágenes promedio de los grupos de años 2003-2006 y 2008-2011.

La comparación indicada en la clase 16 durante el mes de junio da 4% de cambios positivos y 18% negativos. En el mes de noviembre los resultados son más contundentes, pues el 67% de la superficie de la clase tiene disminución de los valores de NDVI que oscila entre 10 y 25 % y el 19% entre 25 y 40% (Fig 5). La clase 17 da unos resultados similares a los de la clase 16 tanto en junio como en noviembre.

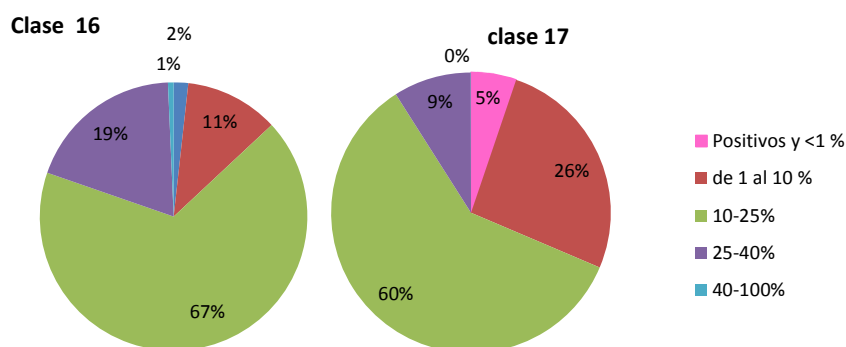


Fig 5. Valores porcentuales de los cambios ocurridos en las clases de pastos de piedemonte en noviembre. Comparación de medias de 2003-2006 y 2008-2011

Las clases 12 y 13 tienen cambios similares entre sí, pero diferentes de los dos anteriores. En conjunto se pueden considerar clases estables o que crecen ligeramente, pero sobre el mapa correspondiente existe una distribución en mosaico de las áreas positivas y negativas (Fig 6).

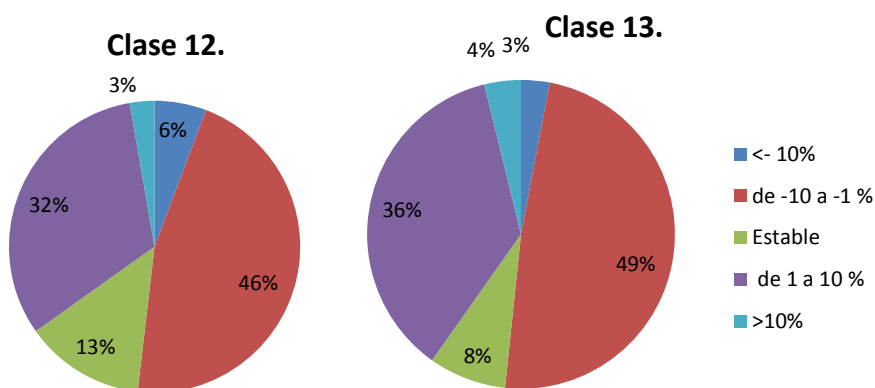


Fig 6. Valores porcentuales de los cambios ocurridos en las clases 12 y 13 de pastos de montaña en el mes de junio. Comparación de medias de 2003-2006- y 2008-2011.

3.3. Variabilidad espacial

Los cambios negativos de la clase 16 están preferentemente localizados en el campo Azálvaro, los municipios que bordean por el sur a la ciudad de Segovia y los municipios segovianos próximos al puerto de Somosierra. Los cambios negativos de la clase 17 están localizados de modo muy similar a los de la clase anterior, pues se concentran en el suroeste de Avila, sur de Segovia y Valle del Lozoya. Por otro lado, los cambios positivos están mayoritariamente localizados dentro de la Comunidad de Madrid.

Los cambios que ocurren en las clases 12 y 13 tienen una localización dispersa. Pueden ser explicados por factores ambientales naturales, como la topografía, la cantidad de roca aflorante y la orientación de la

pendiente. Se aprecian degradaciones en las áreas de más visitadas por excursionistas y evoluciones favorables en lugares puntuales, quizás debido a la disminución de la presión ganadera.

3.4. Influencia de los factores climáticos y ambientales

Mientras que la productividad vegetal de los pastizales situados en los piedemontes ha disminuido desde 2008-2011 en comparación con 2003-2006, la de los de montaña se ha mantenido o ha aumentado ligeramente. Esta situación diferencial está expresada estadísticamente mediante el coeficiente de variación (cociente entre la desviación típica y la media), que es muy alto en las clases 16 y 17 y muy bajo en las clases 12 y 13, indicando que existe en las dos primeras una gran variabilidad interanual en intensidades y ritmos de crecimiento y un desarrollo muy homogéneo cada año en las otras.

Mientras que los pastizales de montaña presentan una dinámica atemporal, asociada a su adaptación a las condiciones naturales propias de la alta montaña, los pastos de piedemonte no solo responden a unas condiciones ambientales que varían cada año sino que el área en la que se producen los cambios está concentrada en lugares concretos.

Para conocer la influencia de los factores climáticos se estudian los datos anuales y mensuales de precipitación de las estaciones meteorológicas de la red principal de AEMET (Agencia Española de Meteorología) de Avila y Segovia (1130 y 1005 m de altitud respectivamente), situadas en el piedemonte norte del Sistema Central, alineadas según una dirección oeste-este. También se consideran los datos de la estación de Puerto de Navacerrada, a 1800m de altitud, en relación al comportamiento de las clases de pastos de montaña.

Las precipitaciones anuales son muy similares en las estaciones de Avila y de Segovia hasta 2008, pero a partir de este año las diferencias aumentan. Entre 2003 y 2011 durante los meses de octubre y noviembre hay una disminución acusada de las precipitaciones en ambas estaciones, que no obstante, es 10% mayor en Avila que en Segovia. Además, entre 2003-2006 las precipitaciones de otoño son 7,5 % superiores en Avila que en Segovia. Entre 2008 y 2011 las precipitaciones son 8% menores en Avila que en Segovia.

Por todo ello se interpreta que la variabilidad de las precipitaciones queda reflejada en la productividad de NDVI de los pastizales del piedemonte norte y es la causa de la tendencia negativa de los mismos, tanto en valores anuales como de otoño. La menor precipitación recibida por Avila respecto a Segovia a partir de 2008 explica la localización del área de mayor degradación de pastos en el campo Azálvaro, que está situado muy próximo a esta ciudad.

La mayor parte de los pastizales identificados en la Comunidad de Madrid están situados en las depresiones húmedas, con suelos encharcados durante la primavera, por lo que su evolución no depende tanto de las precipitaciones sino de las posibilidades locales de acumulación de agua en el subsuelo.

La estación meteorológica del Puerto de Navacerrada muestra unos datos igualmente contrastados entre los grupos de años anteriores y posteriores a 2007. Las precipitaciones anuales fueron 7.6 % inferiores en 2008-2011 que en 2003-2006 y las de otoño 43,6% menores. No obstante, en la evolución temporal que presentan las clases 12 y 13, situadas en las áreas de cumbres próximas a esta estación meteorológica, no hay un desarrollo negativo paralelo a estas deficiencias de precipitación, probablemente debido al modo en que se desarrolla su algido estacional, concentrado preferentemente en julio-agosto. Aunque estos pastos necesitan

una reserva de humedad para desarrollarse, la radiación solar del verano se configura como el factor principal que controla su desarrollo y evolución temporal.

4. Discusión y Conclusiones

La variabilidad de las precipitaciones en España ha sido analizada en repetidas ocasiones y los datos que se presentan son coherentes con estos análisis previos (Gonzalez Hidalgo, Lopez Bustins, Stepanek, Martin-Vide, & de Luis, 2008; Martin-Vide & Fernandez Belmonte, 2001; Ortega, Ortega, & Labajo, 2013). Además, este trabajo permite ver los efectos de éstos déficit de precipitación sobre cubiertas seminaturales de pastizal y detectar la influencia de las variaciones espaciales de éstos déficit en la productividad vegetal expresada a través del índice NDVI. Al mismo tiempo, al analizar cubiertas de pastizal situadas a diferentes altitudes, se ha podido determinar que la relación entre variables climáticas y NDVI no ocurre de modo homogéneo en toda la extensión de un territorio, sino que depende de las secuencias estacionales de crecimiento y senescencia de las diferentes cubiertas que se desarrollan a diferentes altitudes.

La evolución temporal de los pastizales en el área y tramo temporal analizados tiene rasgos diferenciales que dependen del momento del año en el que se produce su desarrollo anual, de las variaciones en la precipitación, de la humedad del suelo sobre el que se asientan de la altitud y de las condiciones topográficas. El otoño es una estación clave para los pastizales del piedemonte norte, ya que es cuando inician su crecimiento y son fuertemente dependientes de las precipitaciones que se producen en esta estación. Los pastizales de Madrid, que se desarrollan sobre suelos húmedos, tienen menor dependencia de las precipitaciones y su evolución es algo mejor que los de la vertiente norte. Los pastizales de montaña, cuyo desarrollo de que se produce en el mes de julio, no muestran una influencia fuerte de las precipitaciones de otoño ni del conjunto del año y su desarrollo parece estar más asociado a la radiación solar.

Este trabajo demuestra la sensibilidad de los pastizales situados en las áreas bajas del Sistema Central a las variaciones de precipitación y expresa el valor de los mismos como indicadores de los cambios climáticos y ambientales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con una beca de movilidad de la Fundación Caja Madrid en 2012.

Referencias

- Barrio, G., Puigdefabregas, J., Sanjuan, M. E., Stellmes, M., & Ruiz, A. (2010). Assesment and monitoring of land condition in the iberian peninsula 1989_2000. *Remote Sensing of the Environment*, 114, 1817-1832.
- CNIG. (2009). Corine land Cover 06 (españa). Retrieved from <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscar.do>.
- de Bie, C. A., Venus, V., & Skidmore, A. (2011). *Improved mapping and monitoring with hyper-temporal imagery*. National Institute for Agroenvironmental Sciences (NIAES):
- Domingo, C., Cristóbal, J., Niyerola, M., & Pons, X. (2008). In Hernandez L., Parreño J. (Eds.), *Detección de pautas de estres hidrico en tres especies forestales de cataluña mediante imagenes TERRA-MODIS*. Servicio de publicaciones y difusión científica de la ULPGC.
- Ganguly, S., Friedl, M., Tan, B., Zhang, X., & Verma, M. (2010). Land surface phenology from MODIS: Characterization of the collection 5 global land cover product. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1805-1816.

- Gonzalez Hidalgo, J. C., Lopez Bustins, J. A., Stepanek, P., Martin-Vide, J., & de Luis, M. (2008). Monthly precipitation trends on the mediterranean fringe of the iberian peninsula during the second half of the twentieth century (1951-2000). *International Journal of Climatology*, 29, 1415-1429.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of the Environment*, 83, 195-213.
- Jiang, Y., de Bie C.A., Wan, T., Skidmore, A., Liu, X., Son, S., & Shao, X. (2013). Hypertemporal remote sensing helps in relating epiphyllous liverworts and evergreen forest. *Journal of Vegetation*, 24, 214-226.
- Julien, Y., & Sobrino, J. (2010). Comparison of cloud reconstruction methods for time series of composite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 618-625.
- Lasanta, T. (2010). Pastoreo en áreas de montaña: Estrategias e impactos en el territorio. *Estudios Geográficos*, 268, 203-233.
- Ma, M., & Veroustraete, F. (2006). Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the northwest of china. *Advances in Space Research*, 37, 835-840.
- MAGRAMA. (1997). Inventario nacional de hábitat. anexo I de la directiva 92/43/CEE. Retrieved from <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/habitat.aspx>
- Martinez Garrido, E., & Sanz Herráiz, C. (2013). La diversidad y valor de los pastizales mediterráneos. In F. (. g. Molinero (Ed.), *Atlas de los paisajes agrarios de españa. tomo I* (pp. 269-287). Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Martin-Vide, J., & Fernandez Belmonte, D. (2001). El índice NAO y la precipitación mensual en la españa peninsular. *Investigaciones Geográficas*, 26, 41-58.
- Monserat-Recoder, P. (2002). Los pastos ibéricos. In Pineda et al. (Ed.), *La diversidad biológica en españa* (pp. 81-88) Pearson Educación.
- Ortega, M. T., Ortega, C. G., & Labajo, J. L. (2013). Aportaciones sobre cambios en las tendencias de las variables climáticas en la meseta central española. *Polígonos. Revista De Geografía*, 24, 43-75.
- Pozo Peñalba, J. M. (2005). Los prados y pastizales españoles en la directiva habitats(92/43CE). *Foresta*, 32, 73-83.
- Rios E., & Salvador, F. (2009). 6220Pastizales xerofiticos mediterráneos de vivaces y anuales. In VVAA (Ed.), *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitats de interés comunitario en españa* (). Madrid: Ministerio de Medio ambiente, Medio Rural y Marino.
- Rivas-Martinez, S. (1986). Leyenda del mapa de series de vegetación. Retrieved from http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/memoria_mapa_series_veg.aspx
- San Miguel Ayanz, A. (2009). Pastos orófilos mediterráneos de festuca indigesta. In Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Ed.), *VVAA: Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitats de interés comunitario en españa* (pp. 1-57)
- SanMiguel Ayanz, A. (2001). El pastoreo en la ordenación de los montes españoles del siglo XXI. *III Congreso Forestal Nacional*, Granada. 1-10.
- Vicente-Serrano, M., Lasanta, T., & Romo, A. (2004). Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the spanish central pyrenees: Role of human management. *Environmental Management*, 34, 802-818.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C.B, Strahler, A.H, Hodges, J. C. F., Gao, F., & Reed, B. C. H., A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475.